УДК 621.384.647

ИССЛЕДОВАНИЕ БАЛАНСА ЗАРЯДА В ДИОДНОМ УЗЛЕ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО УСКОРИТЕЛЯ

А.И. Пушкарев, Р.В. Сазонов

ФГНУ НИИ высоких напряжений, г. Томск
E-mail: aipush@mail.ru

Приведены результаты экспериментального исследования баланса заряда в диодном узле сильноточного импульсного электронного ускорителя ТЭУ-500 (350...500 кэВ, 60 нс, 250 Дж в импульсе) при работе в режиме генерации электронного пучка. Исследования выполнены для планарного диода с катодами диаметром 43...60 мм, изготовленных из графита, меди, углеродной ткани и с многоострийным катодом. Показано, что основным источником паразитных потерь электронов в планарном диоде является их рассыпание в анод-катодном зазоре, вызванное искажением электрического поля на периферии катода. В режиме согласования импеданса диода с выходным сопротивлением наносекундного генератора (зазор 10...12 мм) величина потерь заряда не превышает 12 %. Величина половинного угла рассыпания электронов составляет 68° при малых анод-катодных зазорах и уменьшается с увеличением зазора до 60°.

Введение

Использование импульсного электронного пучка для инициирования плазмохимических процессов, накачки газовых лазеров, генерации СВЧ-излучения и в других областях требует разработки экономичного электронного ускорителя, обладающего большим ресурсом работы и высокой стабильностью рабочих параметров. Любые непроизводительные потери энергии ведут к нагреву, деструкции и преждевременному разрушению конструкционных узлов ускорителя. Выполненные нами экспериментальные исследования и анализ работ других авторов [1, 2] показали, что ресурс работы ускорителя определяется в основном диодным узлом.

Наличие непроизводительных потерь в диодном узле можно определить по балансу токов. Полный ток, поступающий в диодный узел от наносекундного генератора, равен сумме тока выведенного электронного пучка, тока перезарядки емкости диодного узла и тока паразитных потерь. Потери в течение генерации электронного пучка могут быть обусловлены рассыпанием электронов пучка по пути от катода до коллектора цилиндра Фарадея, утечками по поверхности изолятора или паразитными разрядами в вакуумном объеме диодной камеры. Одним из основных источников потерь в диоде является рассыпание электронов. В [3] показано, что электроны в анод-катодном зазоре при отсутствии внешнего ведущего магнитного поля рассыпаются на половинный угол более 40°. При проектировании диодного узла необходимо учитывать рассыпание электронов для предотвращения паразитных потерь.

При анализе баланса токов в диодном узле ускорителя для расчета емкостного тока по соотно-

шению $I_c = C\frac{dU_{емк}}{dt}$ необходимо выполнить дифференцирование сигнала с делителя напряжения. Но при этом возникает большой разброс данных, требующий сглаживания. Сглаживание приводит к значительному затягиванию и смещению фронтов рассчитанных зависимостей, что усложняет интерпретацию данных. Для устранения операции сглаживания был выполнен расчет изменения заряда в диодном узле ускорителя при генерации электронного пучка. Цель выполненной работы – исследование баланса заряда в диодном узле ускорителя в течение генерации электронного пучка для определения источников паразитных потерь потребляемого тока и оптимизации конструкции.

1. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на импульсном электронном ускорителе ТЭУ-500 (350...500 кВ, 60 нс, суммарная кинетическая энергия электронов в импульсе до 250 Дж) [4, 5]. Частота следования импульсов в экспериментах составляла 0,5...1 имп./с.

Отличительной особенностью конструкции ускорителя является использование повышающего трансформатора, включенного между двойной формирующей линией (ДФЛ) и диодом. Насыщение сердечника трансформатора во время зарядки ДФЛ позволило значительно уменьшить амплитуду предимпульса и его влияние на работу диода без применения обостряющего разрядника. В случае предварительного размагничивания сердечника согласующего трансформатора форма импульса напряжения, формируемого наносекундным генератором (ДФЛ и трансформатор), близка к оптимальной, компенсирующей уменьшение импеданса диода за счет разлета взрывоэмиссионной плазмы [6]. Это позволяет согласовать диод с генератором в течение генерации электронного пучка.

Для измерения тока, протекающего в нагрузке наносекундного генератора, использовали пояс Роговского (ПР). Для измерения напряжения использовали емкостной делитель, расположенный в маслонаполненной камере. Полный ток электронного пучка измеряли цилиндром Фарадея (ЦФ). ЦФ откачивался вместе с диодной камерой до давления не выше 0,05 Па. Для временной привязки электрических сигналов были выполнены специальные измерения в режиме короткого замыкания, при работе на резистивную нагрузку и при генерации электронного пучка. Погрешность временной привязки электрических сигналов не превышала 0,5 нс. Калибровка диагностического оборудования показала, что оно корректно отражает работу ускорителя в режиме короткого замыкания (U=50...60 кВ), при работе на резистивную нагрузку до 60 Ом (U=150...200 кВ) или на планарный диод (U=350...500 кВ). Точность измерения напряжения, тока диода, тока электронного пучка, частотные характеристики диагностического оборудования позволяют рассчитать изменение заряда в диодном узле с погрешностью не хуже 10 %.

Исследования были выполнены для планарной конфигурации диода с плоским катодом диаметром 43...60 мм, в качестве анода использовался плоский коллектор ЦФ диаметром 92 мм. На рис. 1 приведены осциллограммы напряжения, приложенного к диоду, и тока электронного пучка, измеренного ЦФ. Осциллограммы усреднены по 10 последовательным импульсам, следующим с частотой 0,5 Гц.

2. Исследование изменения потерь заряда в диодном узле ускорителя в течение генерации электронного пучка

Увеличение заряда, подводимого к диодному узлу от наносекундного генератора, и заряда, переносимого электронным пучком, рассчитывали интегрированием полного тока, потребляемого диодным узлом, и тока электронного пучка соответственно. Заряд в емкости диодного узла равен произведению емкости на величину напряжения.

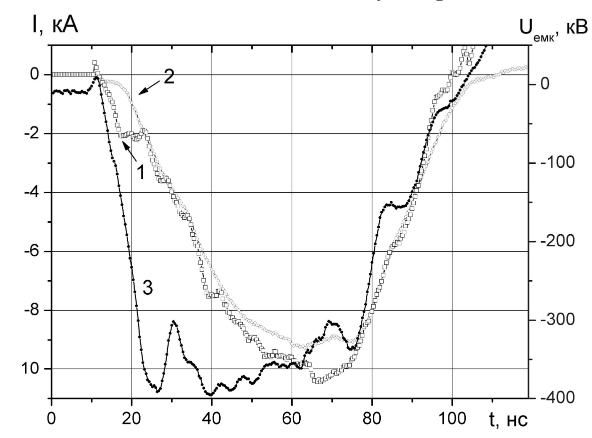


Рис. 1. Осциллограммы: 1) полного тока диода, 2) тока электронного пучка, 3) напряжения, приложенного к планарному диоду. Катод диаметром 45 мм, графит, зазор 10,5 мм

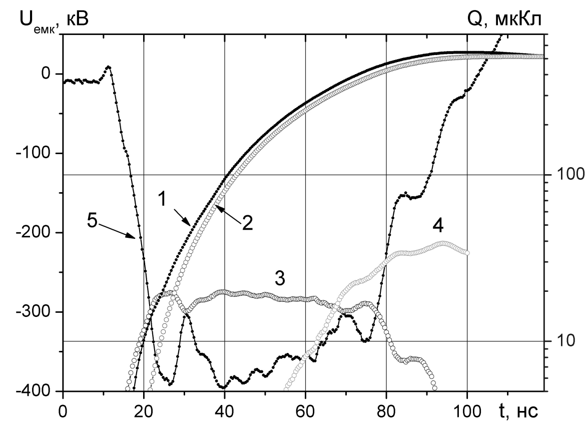


Рис. 2. Баланс заряда в диодном узле в течение генерации электронного пучка: 1) заряд, поступающий от наносекундного генератора, 2) заряд, переносимый электронным пучком, 3) заряд в емкости диодного узла, 4) потери заряда, 5) напряжение на выходе генератора. Катод диаметром 45 мм, графит, зазор 10,5 мм

На рис. 2 показано изменение заряда, поступающего к диодному узлу от наносекундного гене-

ратора, заряда в емкости диодного узла и заряда, переносимого выведенным электронным пучком, в течение генерации электронного пучка. На рис. 2 показаны также потери заряда в диодном узле, равные разности заряда, поступающего от генератора, зарядов выведенного электронного пучка и емкости диодного узла.

Для определения источника потерь заряда в диодном узле были выполнены измерения баланса заряда при разных значениях анод-катодного зазора. На рис. 3 показаны временные зависимости потерь заряда в течение генерации электронного пучка при разных зазорах. Величина потерь заряда нормирована на величину полного заряда, подведенного к диоду от генератора к концу импульса. В режиме согласования импеданса диода с выходным сопротивлением наносекундного генератора (зазор 10...12 мм) величина потерь заряда не превышала 12 %. В течение формирования электронного пучка потери заряда линейно увеличиваются, поэтому они могут быть связаны с рассыпанием электронов пучка. Аналогичные зависимости изменения потерь заряда в течение генерации электронного пучка получены для катодов, выполненных из углеродной ткани, меди, многоострийного медного и вольфрамового катодов.

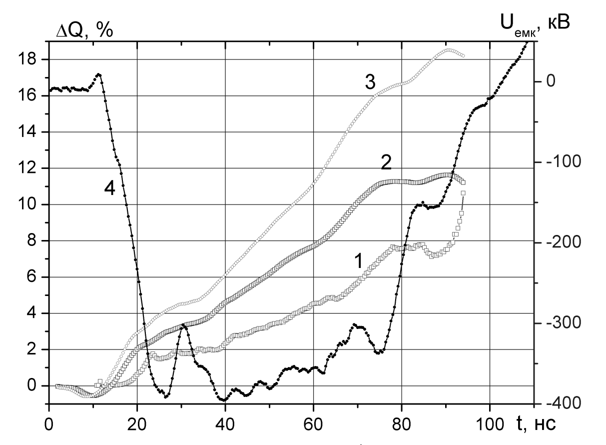


Рис. 3. *Изменение потерь заряда (нормированных на полный заряд, подведенный от наносекундного генератора) в течение генерации электронного пучка, для разных анод-катодных зазоров: 1) 10,5, 2) 12, 3) 15 мм. Зависимость 4 – напряжение, приложенное к диоду. Катод диаметром 45 мм, графит*

3. Исследование полных потерь заряда к концу основного импульса напряжения

Для определения источника потерь в диодном узле ускорителя также были выполнены измерения потерь заряда к концу импульса напряжения (полные потери) для разных анод-катодных зазоров. На рис. 4 показана зависимость полных потерь заряда в диодном узле от величины зазора для диодов с графитовым катодом разного диаметра. Потери нормированы на величину заряда, поступившего в диодный узел от наносекундного генератора за время импульса напряжения. Получено, что потери заряда появляются только при увеличении зазора более 9 мм. Увеличение потерь заряда с увеличением зазора в диоде также показывает, что эти потери связаны с рассыпанием электронов пучка. Дополнительные потери заряда в диодном узле ускорителя, кроме потерь из-за рассыпания электронного пучка, незначительны.

Исследования распределения плотности энергии в поперечном сечении с помощью дозиметрической пленки [7] показали, что средняя плотность энергии электронного пучка на выходе планарного диода (за анодной решеткой) меняется незначительно.

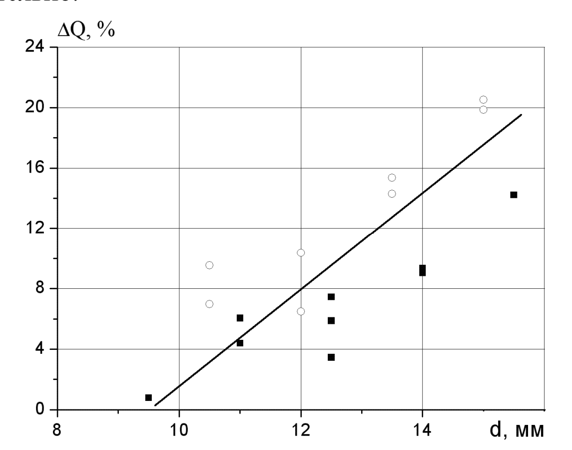


Рис. 4. *Зависимость потерь заряда в диодном узле от величины анод-катодного зазора. Материал катода графит, диаметр 45 мм (■) и 60 мм (o)*

Допустим, что плотность электронов тоже одинакова по всей площади поперечного сечения. Тогда уменьшение числа электронов, попадающих на коллектор ЦФ, с увеличением расстояния катод-коллектор ЦФ d равно разности площади сечения электронного пучка (при расширении на угол рассеяния β после прохождения расстояния d) и площади коллектора ЦФ. Потери заряда при этом равны

$$\Delta Q = q\Delta N = qj\Delta S = qj(\pi(r_к + d\,\mathrm{tg}\beta)^2 - S_{цф}),$$

где q – заряд электрона, j – плотность электронного пучка в поперечном сечении, $r_к$ – радиус катода, $S_{цф}$ – площадь коллектора ЦФ.

Полный заряд электронного пучка, регистрируемый ЦФ, можно записать в виде:

$$Q_e = qjS_{цф}.$$

Относительная величина потерь заряда электронного пучка равна

$$\frac{\Delta Q}{Q_e} = \frac{\pi(r_к + d\cdot\mathrm{tg}\beta)^2 - S_{цф}}{S_{цф}} = \left(\frac{r_к + d\cdot\mathrm{tg}\beta}{r_{цф}}\right)^2 - 1,$$

где $r_{цф}$ – радиус коллектора ЦФ.

Тогда

$$\mathrm{tg}\beta = \frac{1}{d}\cdot\left(r_{цф}\cdot\sqrt{\left(\frac{\Delta Q}{Q_e}+1\right)} - r_к\right). \quad (1)$$

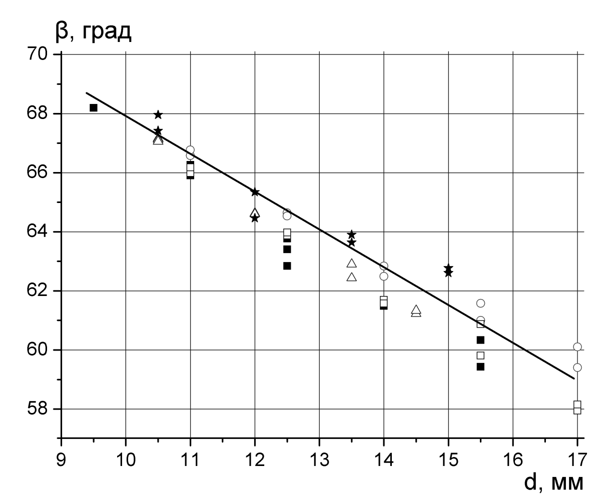


Рис. 5. *Зависимость угла рассеяния электронов от величины анод-катодного зазора. Катоды: графитовый, диаметр 45 мм (■) и 60 мм (*), многоострийный медный, диаметр 43 мм (о), из углеродной ткани, диаметр 45 мм (Δ), многоигольчатый, диаметр 43 мм (□)*

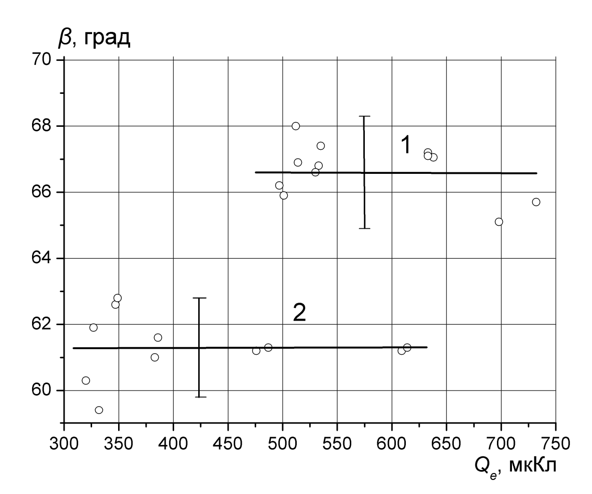


Рис. 6. *Зависимость угла рассеяния электронов от величины полного заряда электронного пучка при зазоре: 1) 10,5...11, 2) 14,5...15,5 мм. Катод диаметром 43...60 мм, разные материалы*

На рис. 5 показана зависимость угла рассеяния электронов пучка от расстояния анод-катод для разных катодов. Расчет выполнен по соотношению (1). Данные рис. 5 соответствуют диоду с катодами диаметром 43...60 мм, выполненными из разных материалов.

Изменение траектории движения электронов в анод-катодном зазоре плоского диода может быть вызвано искажением электрического поля на периферии катода, собственным магнитным полем тока пучка и электростатическим расталкиванием электронов пучка. В двух последних случаях величина угла рассеяния электронов будет зависеть от тока пучка. Были выполнены исследования влияния полного заряда, переносимого электронным пучком, на угол рассеяния электронов (см. рис. 6).

Исследования показали, что угол рассеяния электронов в педелах точности измерений не зависит от величины полного заряда электронного пучка, поэтому основной источник рассыпания электронов в диодном узле – искажение электрического поля на периферии катода.

Заключение

Выполненные исследования баланса заряда диодного узла электронного ускорителя показали, что основным источником паразитных потерь электронов в планарном диоде является их рассеяние в анод-катодном зазоре, вызванное искажением электрического поля на периферии катода. В режиме согласования импеданса диода с выходным сопротивлением наносекундного генератора величина потерь заряда не превышает 12 %. Величина половинного угла рассыпания электронов составляет 68° при малых зазорах и уменьшается с увеличением зазора до 60°. Значения угла рассеяния электронов в зазоре получены при условии однородной плотности электронного тока и соответствуют максимальному углу рассыпания. При уменьшении плотности тока к периферии электронного пучка основная часть электронов распространяется в пределах меньшего угла. Полученные значения угла рассеяния электронов можно использовать при проектировании анодного узла ускорителя.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 06-08-00147 и 06-03-46002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
2. Соковнин С.Ю., Котов Ю.А., Балезин М.Е. Частотные наносекундные электронные ускорители серии УРТ // Радиационная физика и химия неорганических материалов: Труды 12 Междунар. конф. – Томск, 23-27.09.03. – Томск, 2003. – С. 428–430.
3. Parker R.K., Anderson R.E., Duncan C.V. Plasma-induced field emission and the characteristics of high-current relativistic electron flow // Journal of Applied Physics. – 1974. – V. 4. – № 6. – P. 2463–2479.
4. Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г., Пушкарев А.И., Карпузов С.Б., Кондратьев Н.А., Гончаров Д.В. Импульсный сильноточный ускоритель с согласующим трансформатором // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 3. – С. 130–134.
5. Пат. на ПМ 41951 РФ. МПК[7] H05H 5/08. Импульсный электронный ускоритель / Д.В. Гончаров, Г.Е. Ремнев, А.И. Пушкарев, Э.Г. Фурман. Заявлено 15.06.2004, Опубл. 10.11.2004, Бюл. № 31.
6. Ремнев Г.Е., Пушкарев А.И., Фурман Э.Г. Согласование двойной формирующей линии с взрывоэмиссионным диодом // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30. – № 14. – С. 63–67.
7. Гончаров Д.В., Ежов В.В., Пушкарев А.И., Ремнев Г.Е. Исследование распределения плотности энергии сильноточного импульсного электронного пучка // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 6. – С. 76–80.

Поступила 06.09.2006 г.